内蒙古光伏开发空间适宜性及减排效益研究

徐 伟， 刘振领

（内蒙古科技大学土木工程学院，内蒙古 包头 014000）

摘 要：内蒙古自治区作为中国重要的光伏发电基地，近年来盲目建设光伏电站的问题日益突出，掌握区域光伏开发的适宜性、发电潜力和减排效益对光伏产业的健康发展具有重要意义。为了探讨内蒙古自治区光伏开发适宜性与减排效益，综合利用气象、自然地理和经济社会数据，通过构建“气象-地形-位置-植被”光伏开发适宜性综合评价指标体系，利用层次分析法确定评价指标的权重，借助地理信息系统工具对内蒙古自治区光伏开发适宜性进行空间显性评价，进而定量评估在不同开发强度下的光伏发电潜力与减排效益，并对各盟市光伏发电潜力与电力需求进行对比分析。结果表明：(1) 内蒙古自治区西部的光伏开发适宜性大于中部和东部，各类适宜区主要分布在西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市，光伏开发特别适宜、较适宜和适宜区域的面积占内蒙古自治区总面积的23.66%。(2) 内蒙古自治区光伏发电潜力巨大，特别适宜的区域开发12.57%即可满足内蒙古自治区2021年用电量。(3) 内蒙古自治区光伏发电潜力与电力需求分布有着较强的空间异质性，空间格局特征显著。(4) 内蒙古自治区光伏发电的节能减排效果显著，与传统燃煤火力发电相比，若特别适宜区全部开发，年碳减排量约2.947×10^9 t，是2021年内蒙古自治区碳排放总量的4.46倍，占我国2021年碳排放总量的21.20%。研究结果为内蒙古自治区光伏电站选址和光伏产业的健康发展提供科学参考和指导建议。

关 键 词：地理信息系统；光伏发电；适宜性评价；发电潜力；减排效益；内蒙古

文章编号：1000-6060(2024)04-0684-11(0684~0694)

面对着碳减排和能源危机的双重挑战，建立以可再生能源为主体的能源体系是解决能源危机和环境安全问题的重要途径[1]。太阳能相比于其他可再生能源具有分布广泛、就地可取、无需运输、对环境影响小等优势，光伏发电是利用太阳能的主要方式之一，发展光伏发电对碳减排及改善生态环境具有重要意义[2]。对区域光伏开发适宜性评价是太阳能资源开发利用的前提和基础，其对保证太阳能光伏项目的经济效益和制定科学的开发路径至关重要[3-4]。

随着地理信息技术的发展和普及，国内外许多研究者通过地理信息系统（Geographic information system，GIS）与多准则决策（Multi-criteria decision making，MCDM）方法结合来分析不同区域光伏开发的适宜性与发电潜力[5]。例如，Noorollahi等[6]运用模糊逻辑与层次分析法（Analytic hierarchy proces，AHP）结合，通过选取气候、地形、经济指标，借助GIS对伊朗Khuzestan省光伏开发适宜性进行研究，确定光伏电站的最佳选址。Hassaan等[7]利用AHP确定太阳辐射量、地形等适宜性评价指标的权重，评估了科威特光伏开发的适宜性，并对特别适宜地区光伏发电潜力进行了评估。Sun等[8]将GIS与AHP结合，在选取了气候、地形、水源、道路等评价因子的基础上，以中国宁夏回族自治区为例，确定了光伏电站与聚光太阳能发电站的最佳选址，并评估了主要城市的发电潜力。刘立程等[9]基于遥感数据、气象数据和基础地理数据构建光伏开发适宜性评价指标体系，评估了京津冀地区光伏开发的适宜

收稿日期：2023-05-18； **修订日期**：2023-07-18

基金项目：国家社会科学基金项目（22XJY001）；内蒙古自治区哲学社会规划项目（2022NDC220）资助

作者简介：徐伟（1970-），女，工学博士，教授，主要从事城乡建设与可持续发展等方面的研究. E-mail: btxuwei2006@126.com

通讯作者：刘振领（1998-），男，硕士研究生，主要从事城乡建设与可持续发展等方面的研究. E-mail: m17861856998@163.com

性，估算了光伏发电潜力和减排效益。

因此，GIS技术与MCDM方法结合分析光伏开发适宜性问题已经是一种较为可行的方法[10]。但是以往研究在适宜性评价指标的选取与分类上还有一定的细化空间，已有研究选取适宜性评价指标集中在气象、地形、位置上，较少把植被、河流距离、保护区距离等作为评价指标[11-12]。并且已有研究大多对研究区光伏发电潜力进行了评估，而对光伏发电潜力与电力需求的对比分析和不同开发强度下的节能减排效益研究较少。

在此背景下，本研究综合考虑气象、地形、位置、植被等指标创建光伏开发适宜性评价指标体系，对内蒙古自治区光伏开发适宜性进行空间显性评价，并量化其在不同开发强度下的发电潜力与减排效益，志在为以后的光伏开发选址工作及开发路径的选择提供科学的依据。此外，本研究还从市域角度对内蒙古自治区光伏发电潜力与电力需求做了对比分析，以期为内蒙古自治区能源结构的调整和光伏产业的合理发展提供有力的支撑。

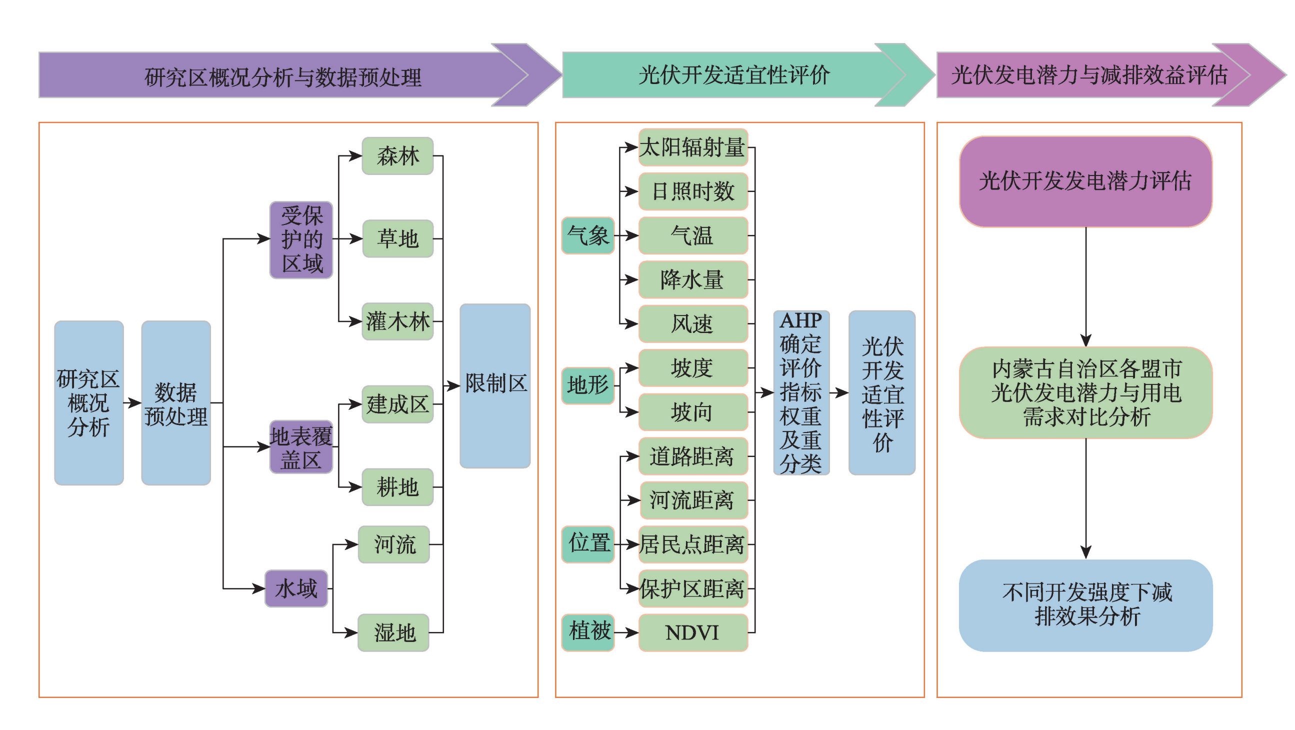
1　材料与方法

1.1　研究技术路线

本研究将GIS技术与AHP结合，对内蒙古自治区光伏开发适宜性进行评价，研究流程如图1所示。研究流程分为3步，首先对内蒙古自治区的基本概况进行分析和数据预处理，剔除内蒙古自治区内保护区、建成区、水域等不适合建设光伏电站的限制区[13]。其次是通过选取4个一级指标、12个二级指标构建光伏开发适宜性评价指标体系，对剔除限制区后的区域进行适宜性评价，依据评价结果将研究区域划分为不适宜、较不适宜、适宜、较适宜、特别适宜5类，并获得其空间分布特征。最后在综合考虑光伏板的发电效率及损耗率的基础上，估算在不同开发强度下内蒙古自治区光伏的发电潜力与减排效益，并从市域角度对光伏发电潜力与电力需求进行对比分析。

1.2　研究区概况

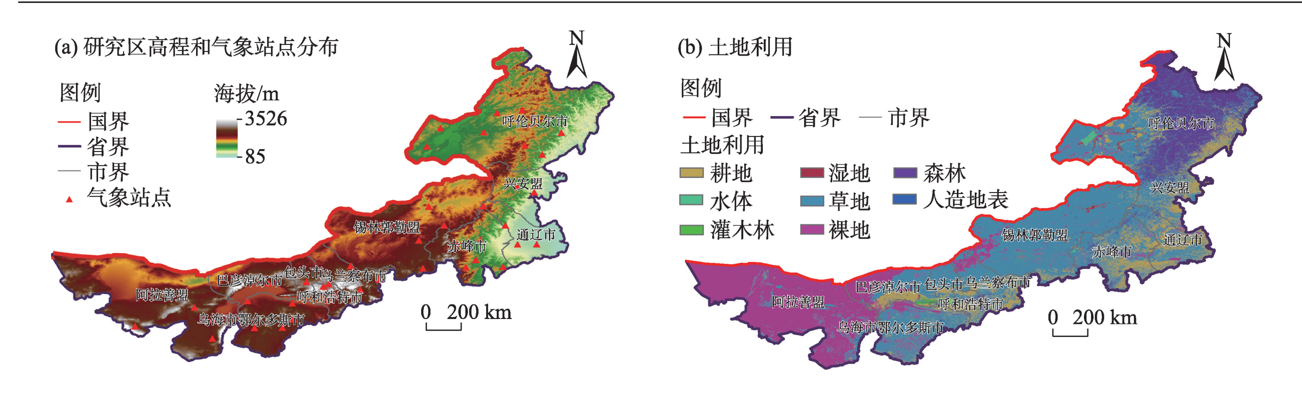
内蒙古自治区地理位置介于37°24′~53°23′N，97°12′~126°04′E之间，区域总面积为1.183×10^6 km²，人口约2.4×10^7人，包括呼和浩特、包头、鄂尔多斯等12个盟市，按照区位可以将其分为内蒙古自治区西部（包头市、鄂尔多斯市、乌海市、巴彦淖尔市、阿拉善盟）、中部（呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟）和东部（赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市）。内蒙古自治区平均海拔1800 m（图2a），内蒙古自治区内土地利用类型包括草地、耕地、森林等8种（图2b）。内



注：AHP为层次分析法；NDVI为归一化植被指数。

图1　研究流程图

Fig. 1　Flow chart of the study



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图2 研究区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the study area

蒙古自治区气候类型主要为温带大陆性气候,日照充足,降水较少,地理分布由东北向西南斜伸,幅员辽阔,盟市之间气候和太阳能资源差异显著。内蒙古东部地区降水相对较多,气候较为湿润,土地利用类型以草地为主。西部地区降水较少,气候干燥,土地利用类型以裸地沙漠为主。从太阳辐射量分布(图3a)和日照时数>6 h天数分布(图3b)来看,内蒙古自治区太阳能资源丰富稳定,且西部太阳能资源最为丰富。2022年内蒙古自治区累计光伏装机容量1.55×10^7 kW,新增装机容量1.44×10^6 kW,作为我国北方重要的新能源基地及国家可再生能源综合示范区,内蒙古自治区具有巨大的光伏开发潜力与价值[14]。

1.3 数据获取及预处理

本研究使用的数据主要有以下5类,分别是遥感数据、气象数据、基础地理要素数据、地形数据和社会经济数据。其中遥感数据包括整体水平辐照数据、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)数据和土地利用类型数据,内蒙古自治区45个气象站点的气象数据包括逐日气温、降水量、风速、日照时数数据,基础地理要素数据包括道路、居民点、保护区、河流、行政边界数据,地形数据为数字高程模型(Digital elevation modal,DEM)数据,社会经济数据为内蒙古自治区统计局发布的2021年内蒙古自治区各盟市全社会电力消费量。数据具体来源及预处理方式见表1,使用的所有数据都经过投影变换、剪切、重采样等数据处理过程,坐标系统一采用WGS_1984_UTM_zone_50N,空间分辨率统一为500 m×500 m。

1.4 评价指标选取及合理性分析

光伏电站的适宜性评价需考虑多因素的影响[15],在参考相关研究文献的基础上,再结合内蒙古自治区自身发展的特点,选取气象、地形、位置、植被作为一级指标,进一步将4个一级指标分为12个二级指标建立光伏开发适宜性评价指标体系,对内蒙古自治区光伏开发适宜性进行评价。

气象指标包括太阳辐射量、日照时数、气温、降水量、风速5个二级指标。太阳辐射量与光伏发电

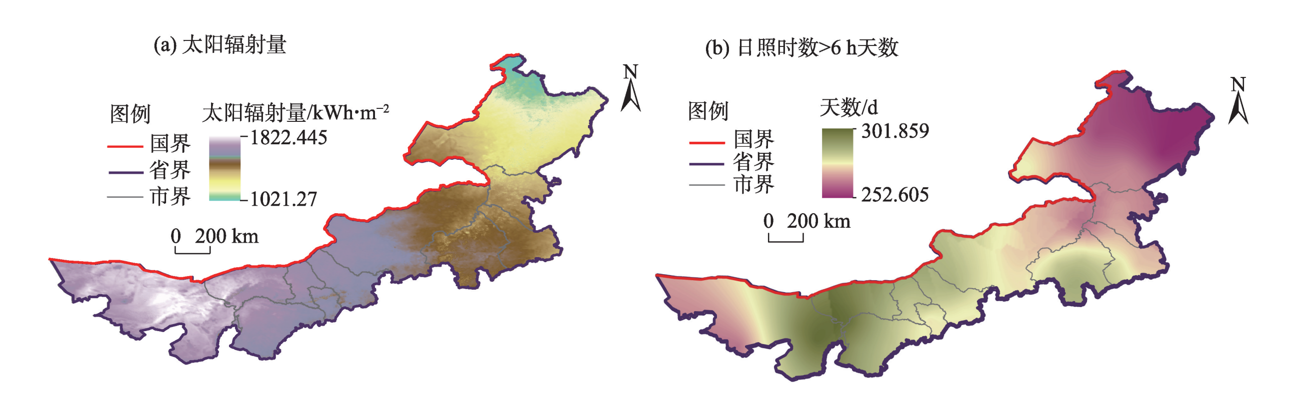


图3 研究区太阳能资源概况

Fig. 3 Overview of solar energy resources in the study area

表1　数据来源及预处理方法

Tab. 1　Data sources and pre-processing methods

数据名称	处理方法	数据来源
整体水平辐照	多年平均值	Global Solar Atl-as2.0
归一化植被指数	2012—2022年平均值	美国航空航天局发布的MODISMOD13A1产品
土地利用类型	按照用地类型把研究区域划分为限制区和非限制区2类，并剔除限制区	全球地表覆盖数据库Globeland30（2020版）
气温	采用Anusplin插值软件进行空间插值	中国气象科学数据共享服务网
降水量、风速、日照时数	借助ArcMap 10.8软件采用Kriging法进行空间插值	中国气象科学数据共享服务网
道路、居民点、保护区、河流	欧氏距离分析	全国基础地理数据库
数字高程模型	生成坡度和坡向数据	地理空间数据云平台

站发电量密切相关，是适宜性评价重要的指标。日照时数、气温和降水量影响太阳辐射量的稳定程度，进而影响光伏发电的效率。风速主要影响光伏电池板的安全，风速过高会造成光伏电池板的损坏，进而造成运营维护成本增加[16]。地形指标包括坡度和坡向2个二级指标。坡度和坡向影响太阳辐射强度和日照时数，进而影响太阳能资源空间分布，且随着坡度的增加光伏电站的建设难度与建造成本也会增加。位置指标主要包括道路距离、居民点距离、河流距离、保护区距离。靠近道路可以降低前期建设的运输成本与后期的运营维护成本。离居民点越近越靠近电力消费市场，可以降低电力通过电网的运输成本与损耗[17]。内蒙古自治区春天多扬尘天气，靠近河流方便清洗光伏板积灰。内蒙古自治区作为我国北方重要的生态屏障，建设光伏电站应避开自然保护区，建在植被覆盖率低的区域。

1.5 研究方法

1.5.1 AHP确定评价指标权重　本研究采用AHP确定评价指标的权重，AHP是MCDM中常用的方法之一。AHP是将问题分为若干层次，每个层次再分为若干个指标，根据9级标度法两两比较指标的重要程度，从而确定每个指标的权重[18]。若某层次有n个指标，构造判断矩阵P。

$$P=\left(P_{ij}\right)_{n\times n}=\begin{pmatrix}P_{11}P_{12}\cdots P_{1n}\\P_{21}P_{22}\cdots P_{2n}\\\vdots\ \ \vdots\ \ \ \ \vdots\\P_{n1}P_{n2}\cdots P_{nn}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & P_{12}\cdots P_{1n}\\\frac{1}{P_{21}} & 1\cdots P_{2n}\\\vdots & \vdots\ \ \ \ \vdots\\\frac{1}{p_{n1}} & \frac{2}{P_{n2}}\cdots 1\end{pmatrix}\tag{1}$$

式中：P_{ij}为第i个指标相比于第j个指标重要程度的判断值，$P_{ji}=\frac{1}{P_{ij}}$（i, j=1, 2, ⋯, n），n为指标个数，若i=j，$P_{ij}=P_{ji}$。

1.5.2 光伏开发适宜性计算　将适宜性评价指标体系的各个二级指标按照等间隔距离法分为1~10级，极大型指标值越大分级越大，极小型指标则相反。极大型指标包括太阳辐射量、日照时数和保护区距离，极小型指标包括坡度、降水量、气温、风速、居民点距离、河流距离和道路距离。坡向属于区间指标，内蒙古自治区位于北半球，所以南向和平面分级最高，北向分级最低。利用分级后二级指标的级数和一二级指标的权重计算适宜性指数，计算公式为：

$$\mathrm{Si}=\sum_{r=1}^{4}\left[W_r\times\sum_{l=1}^{s}\left(W_{rl}\times C_{rl}\right)\right]\tag{2}$$

式中：Si为光伏开发适宜性指数；W_r为第r个一级指标的权重（r=1, 2, 3, 4）；W_{rl}为第r个一级指标下第l个二级指标权重（l=1, 2, 3, ⋯, s）；s为第r个一级指标下二级指标个数；C_{rl}为第r个一级指标下第l个分级后二级指标的级数。

1.5.3 光伏发电潜力评估　光伏发电潜力的评估是光伏电站项目前期可行性研究的重要环节，为了评估光伏发电潜力，需要将太阳能转化为总能量输出，而光伏板的类型是影响总能量输出效率的主要因素[19]。目前市场上光伏板的类型主要有单晶硅、多晶硅、非晶硅等，本研究采用目前应用最为广泛的多晶硅光伏板计算光伏发电的潜力，其能量转换效率为16.5%。光伏发电潜力还受弃光率、单位面积受到的年太阳辐射量、适宜建设光伏电站的面积、接受太阳辐射的面积因子、发电量损耗率因素的影响。综合考虑以上影响因素，光伏发电潜力的计算公式为：

$$\mathrm{SEGP}=\mathrm{SA}\times\mathrm{AF}\times\mathrm{ASR}\times\mathrm{PE}\times\left(1-\mathrm{LO}\right)\times\left(1-\mathrm{AP}\right)\tag{3}$$

式中：SEGP为光伏发电潜力(kWh)；SA为适宜建设光伏电站的面积(m^2)；AF为接受太阳辐射的面积因子，本研究取0.35；ASR为单位面积受到的年太阳辐射量($kWh\cdot m^{-2}$)；PE为光伏板的发电效率；LO为发电量损耗率；AP为弃光率，具体参数值及设置标准见表2。

表2 光伏发电潜力评估参数设置

Tab. 2 Parameter settings for photovoltaic power potential assessment

参数	设定依据	参数值
AF(接受太阳辐射的面积因子)	Zhao等[20]	0.35
ASR(单位面积受到的年太阳辐射量)	平均太阳辐射量	1421.8575
PE(光伏板的发电效率)	多晶硅电池板发电转换效率	16.5%
LO(发电量损耗率)	Li等[21]	7.5%
AP(弃光率)	国家可再生能源中心	4.0%

2 结果与分析

2.1 权重结果分析

本研究通过咨询太阳能领域的专家和查阅相关文献构建12阶权重判断矩阵，对权重判断矩阵P进行归一化处理，将矩阵P每一列的值相加，然后每一项除以它所在列的和。最后将归一化后的矩阵对行求平均，得到相对权重。为了确保结果有效性，需要对判断矩阵进行一致性检验，其公式如下：

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{4}$$

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{5}$$

式中：CR为一致性比率，如果CR<0.1，则通过一致性检验，否则就要对判断矩阵进行修正；RI为随机一致性指标(表3)；CI为一致性指标；λ_{max}为最大特征值；n为指标个数。

表3 随机一致性指标

Tab. 3 Random consistency indicators

n	1	2	3	4	5	6
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
RI	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

注：n为判断矩阵行数；RI为随机一致性指标。

用特征值法求解矩阵的最大特征值与特征向量，求得最大特征值$\lambda_{max}=12.0155$。最后得到各指标的最终权重(表4)，一致性检验CR为0.00091<0.1，权重结果有效。

表4 光伏开发适宜性评价指标和权重

Tab. 4 Photovoltaic development suitability evaluation indicators and weights

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重
光伏开发	气象	0.55	太阳辐射量	0.51
			日照时数	0.26
			气温	0.10
			降水量	0.08
			风速	0.05
	地形	0.14	坡度	0.66
			坡向	0.34
	位置	0.23	道路距离	0.28
			居民点距离	0.50
			河流距离	0.07
			保护区距离	0.15
	植被	0.08	NDVI	1.00

注：NDVI为归一化植被指数。

2.2 评价指标分级及分布规律分析

内蒙古自治区太阳辐射量分级(图4a)总体分级较高，内蒙古自治区西部分级高于东部分级，分级最高的区域分布在西部的阿拉善盟、巴彦淖尔市，分级较低的地区主要分布在东部的呼伦贝尔市。日照时数分级(图4b)较高的区域主要在阿拉善盟和赤峰市，分级较低的区域主要在呼伦贝尔市。气温分级(图4c)较低的区域主要集中在阿拉善盟的南部、乌海市、鄂尔多斯市的部分地区，分级较高的区域主要集中在呼伦贝尔市的北部地区。降水量分级(图4d)由内蒙古自治区东部向西部依次递增，分级最高的是阿拉善盟，最低的是呼伦贝尔市。风速分级(图4e)较高的区域主要分布在包头市、鄂尔多斯市、呼和浩特市和呼伦贝尔市的东北部，分级较低的区域主要在阿拉善盟的西部。保护区距离分级(图4f)较高的区域较小，主要分布在内蒙古自治区中部和西部的北部地区，其余区域分级普遍较低。道路距离(图4g)、河流距离(图4h)、居民点距离(图4i)分级最低的是阿拉善盟的小部分地区，其余区域分级普遍较高。坡度分级(图4j)较低的地区主要分布在呼伦贝尔市的西部，通辽市、

图4　光伏开发适宜性评价二级指标分级

Fig. 4　Classification of secondary indicators for photovoltaic development suitability assessment

兴安盟和包头市，鄂尔多斯市也有部分地区分级较低，其他区域分级差异较小，普遍较高。坡向分级(图4k)南向和平面分级较高，北向分级较低。NDVI分级(图4l)呈现出由内蒙古自治区西部向东部依次递减的趋势，分级最高的是阿拉善盟，最低的是呼伦贝尔市。总体而言，光伏开发适宜性评价二级指标空间分布的差异性较为显著。

2.3　光伏开发适宜性分析

剔除限制区后，光伏开发适宜性评估的区域占内蒙古自治区总面积的24.24%。光伏开发适宜性指数的范围在[5.223, 9.213]之间，按照等间隔距离法分为5类(图5)，分别定义为不适宜[5.223, 6.021)、较不适宜[6.021, 6.819)、适宜[6.819, 7.517)、较适宜[7.517, 8.415)、特别适宜[8.415, 9.213]。特别适宜区

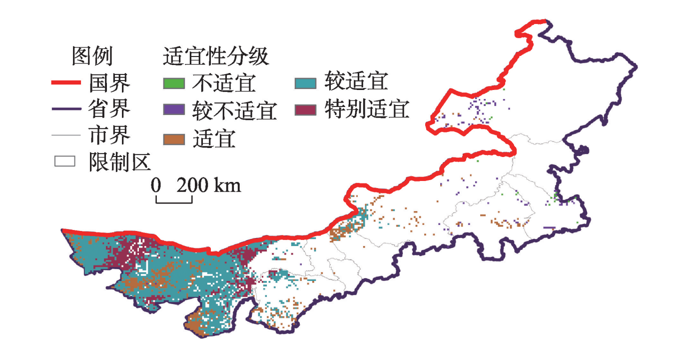


图5　内蒙古自治区光伏开发适宜性

Fig. 5　Suitability of photovoltaic development in the Inner Mongolia Autonomous Region

域的面积为50184.54 km^2(表5)，占评估区域总面积的17.50%；较适宜区域的面积最广为186009.32

表5 各盟市不同适宜类型的土地面积

Tab. 5 Area of land of different suitable types in each city and league /km²

城市	特别适宜区面积	较适宜区面积	适宜区面积	较不适宜区面积	不适宜区面积
阿拉善盟	39438.75	155277.57	27985.94	192.90	0.00
巴彦淖尔市	9395.69	16386.60	283.85	57.91	0.00
包头市	0.00	377.99	631.88	0.00	0.00
赤峰市	1350.10	0.00	1924.86	884.82	82.40
鄂尔多斯市	0.00	7740.21	4484.42	0.00	0.00
呼和浩特市	0.00	0.00	102.25	0.00	0.00
呼伦贝尔市	0.00	0.00	312.45	2698.23	231.62
通辽市	0.00	0.00	173.91	926.48	220.17
乌海市	0.00	85.32	57.91	0.00	0.00
乌兰察布市	0.00	1493.56	3637.92	0.00	0.00
锡林郭勒盟	0.00	4648.07	4110.55	718.69	0.00
兴安盟	0.00	0.00	0.00	332.24	459.46
总面积	50184.54	186009.32	43705.94	5811.27	993.65

km^2,占评估区域总面积的64.88%;适宜区域的面积为43705.94 km^2,占评估区域总面积的15.24%;较不适宜和不适宜区域总面积为6804.92 km^2,占评估区域总面积的比例较小为2.38%。特别适宜、较适宜和适宜区域面积共计279899.80 km^2;占内蒙古自治区总面积的23.66%。特别适宜的区域分布在阿拉善盟、巴彦淖尔市和赤峰市,其中阿拉善盟所占面积比例最高达到78.59%,其次是巴彦淖尔市。较适宜区域分布的市有阿拉善盟、巴彦淖尔市、包头市、鄂尔多斯市、乌海市、乌兰察布市和锡林郭勒盟,阿拉善盟所占面积比例最高达到83.48%。适宜区域分布最为广泛,除了兴安盟其余11个市均有分布。较不适宜区域和不适宜区域相比于以上3种类型面积较小,较不适宜区域面积占比最大的是呼伦贝尔市,不适宜区域面积占比最大的是兴安盟。

内蒙古自治区光伏开发适宜性呈现出西部大于中部和东部的空间格局特征,特别适宜、较适宜和适宜区域主要分布在西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市、包头市、鄂尔多斯市、东部的赤峰市等也有少量分布。这些区域具有光伏开发的天然优势,区域内地形平坦,坡度较小,太阳辐射量1600 kWh·m^{-2}以上,年平均日照时数大于2950 h,降水量、风速等气象条件较好,植被覆盖率较低,并且离道路、居民点和河流的距离适中,大大提高了光伏发电的效率,降低了光伏电站建设的运输成本与电力通过电网输送的成本。较不适宜与不适宜地区主要分布在呼伦贝尔市和兴安盟市,这些地区太阳辐射量和年平均日照时数相对较低,降水量、风速等气象条件较差,坡度较大,光伏发电效率较低,建设光伏电站施工难度与成本较高。

2.4 光伏发电潜力与电力需求分析

通过内蒙古自治区发电潜力评估,发现内蒙古自治区发电潜力巨大。若将特别适宜、较适宜和适宜的区域全部开发,年发电量将达到2.0409×10^{13} kWh,相当于内蒙古自治区2021年用电量的44.37倍。特别适宜区域的年发电潜力为36592.41 TWh,适宜区的年发电潜力为135630.00 TWh,适宜区年发电潜力为31868.5 TWh(表6),其中特别适宜的区域开

表6 内蒙古自治区光伏不同开发情形下的发电潜力

Tab. 6 Power generation potential of photovoltaic in Inner Mongolia Autonomous Region under different development scenarios

开发情景		情景解释	面积/km^2	发电潜力/TWh
S1	S1-Q1	特别适宜区开发25%	12546.14	9148.11
	S1-Q2	特别适宜区开发50%	25092.27	18296.20
	S1-Q3	特别适宜区开发75%	37638.41	27444.31
	S1-Q4	特别适宜区开发100%	50184.54	36592.41
S2	S2-Q1	较适宜区开发 25%	46502.33	33907.50
	S2-Q2	较适宜区开发 50%	93004.66	67815.00
	S2-Q3	较适宜区开发 75%	139506.99	101722.50
	S2-Q4	较适宜区开发 100%	186009.32	135630.00
S3	S3-Q1	适宜区开发25%	10926.49	7967.12
	S3-Q2	适宜区开发50%	21852.97	15934.25
	S3-Q3	适宜区开发75%	32779.46	23901.37
	S3-Q4	适宜区开发100%	43705.94	31868.50

发12.57%即可满足内蒙古自治区2021年用电量。

研究发现内蒙古自治区光伏发电潜力与电力需求分布有着较强的空间异质性，空间格局特征显著。从整体来看，内蒙古自治区西部光伏发电潜力大于中部和东部，内蒙古自治区西部、中部和东部的光伏发电潜力占内蒙古自治区总光伏发电潜力的比例分别为93.66%、5.18%和1.16%(图6a)。从市域的角度分析，内蒙古自治区12个盟市中，阿拉善盟和巴彦淖尔市光伏发电潜力占特别适宜区、较适宜区和内蒙古自治区总光伏发电潜力的比例分别为97.31%(图7a)、92.29%(图7b)和88.88%(图6a)，而阿拉善盟和巴彦淖尔市2021年用电量仅占内蒙古自治区用电量的5.19%(图6b)。总体来看，内蒙古自治区电力需求差异较为显著。呼包鄂城市群相比于其他盟市经济发达，工业产业聚集，电力需求旺盛[22]，但是光伏发电潜力不足，电力大部分来自燃煤发电火电厂，碳减排与环境问题突出，而光伏发电潜力最高的区域位于内蒙古自治区最西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市。

2.5 不同开发强度下的减排效果分析

光伏开发受到国家政策、电力需求等因素的影响，不是一蹴而就的事，要有一个循序渐进的过程，在较短的时间内很难实现大规模的光伏开发。本研究考虑到光伏发电在未来能源结构中所占比例会逐步上升，按照特别适宜、较适宜和适宜区域的开发比例，设置12种开发情形分析减排效果(表7)。目前我国最主要的发电方式仍以燃煤发电为主，所以本研究用燃煤发电方式作为对比评价光伏

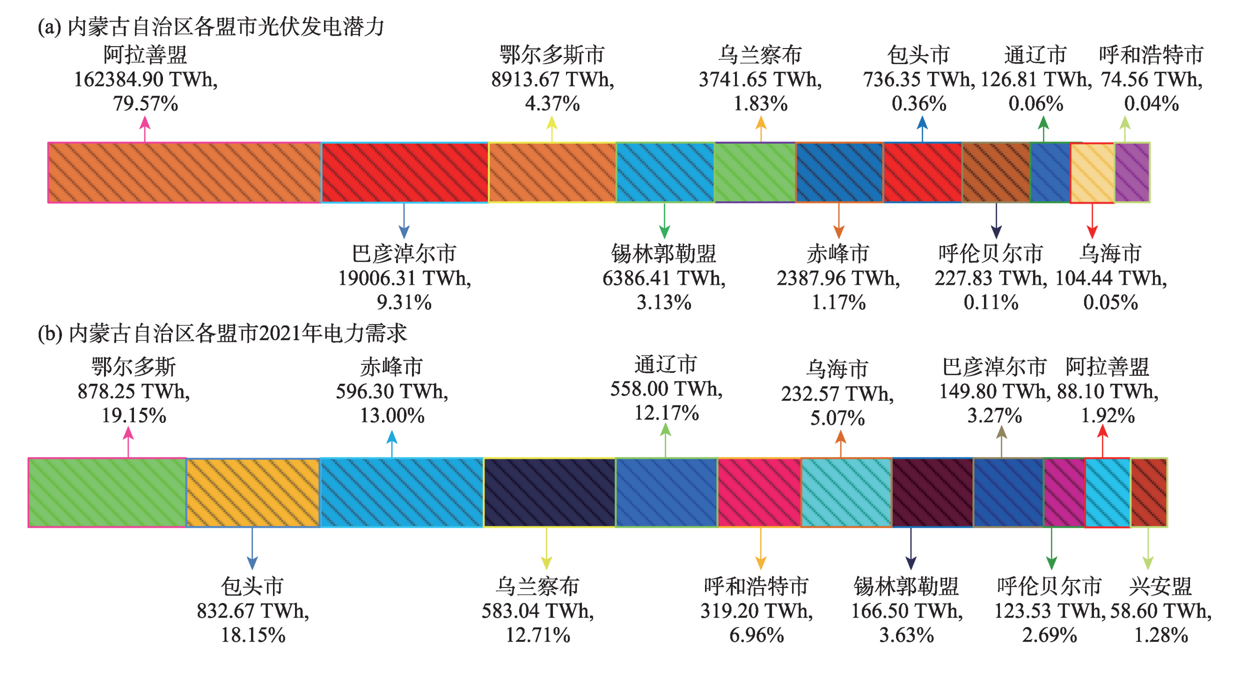


图6　内蒙古自治区各盟市光伏发电潜力与2021年用电需求

Fig. 6　Photovoltaic power generation potential and electricity demand in 2021 by municipality in Inner Mongolia Autonomous Region

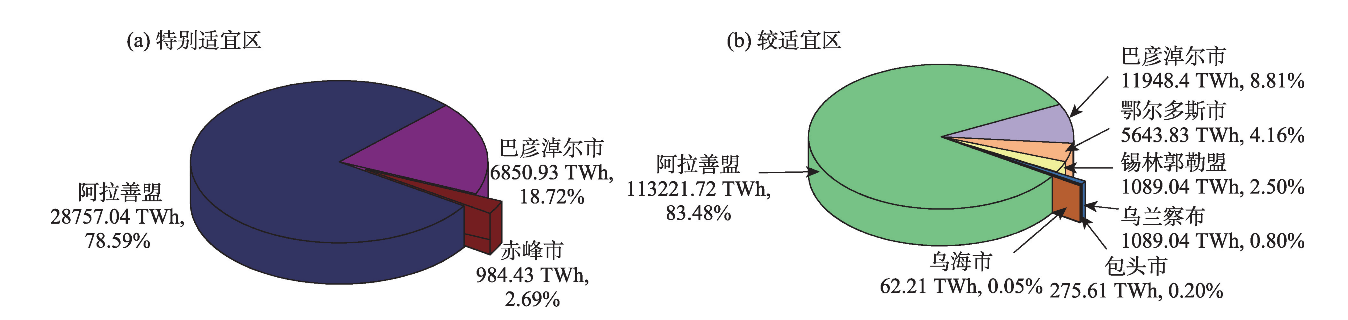


图7　特别适宜区与较适宜区各盟市光伏发电潜力

Fig. 7　Photovoltaic power generation potential by municipality in the specially suitable and more suitable zones

表7 不同光伏开发强度下的减排效果

Tab. 7 Emission reductions at different photovoltaic development intensities

开发情景		情景解释	减排效果/t				
			标准煤	CO_2	SO_2	NO_x	TSP
S1	S1-Q1	特别适宜区开发25%	2.767×10^8	7.367×10^8	6.088×10^6	2.767×10^6	4.704×10^6
	S1-Q2	特别适宜区开发50%	5.535×10^8	1.473×10^9	1.218×10^7	5.535×10^6	9.409×10^6
	S1-Q3	特别适宜区开发75%	8.302×10^8	2.210×10^9	1.826×10^7	8.302×10^6	1.411×10^7
	S1-Q4	特别适宜区开发100%	1.107×10^9	2.947×10^9	2.435×10^7	1.107×10^7	1.882×10^7
S2	S2-Q1	较适宜区开发25%	1.026×10^9	2.730×10^9	2.257×10^7	1.026×10^7	1.744×10^7
	S2-Q2	较适宜区开发50%	2.051×10^9	5.461×10^9	4.513×10^7	2.051×10^7	3.487×10^7
	S2-Q3	较适宜区开发75%	3.077×10^9	8.191×10^9	6.770×10^7	3.077×10^7	5.231×10^7
	S2-Q4	较适宜区开发100%	4.103×10^9	1.092×10^{10}	9.026×10^7	4.103×10^7	6.975×10^7
S3	S3-Q1	适宜区开发25%	2.410×10^8	6.416×10^8	5.302×10^6	2.410×10^6	4.097×10^6
	S3-Q2	适宜区开发50%	4.820×10^8	1.283×10^9	1.060×10^7	4.820×10^6	8.194×10^6
	S3-Q3	适宜区开发75%	7.230×10^8	1.925×10^9	1.591×10^7	7.230×10^6	1.229×10^7
	S3-Q4	适宜区开发100%	9.640×10^8	2.566×10^9	2.123×10^7	9.640×10^6	1.639×10^7

注：NO_x为氮氧化物；TSP为总悬浮颗粒物。

发电的减排效果，2021年我国的平均供电煤耗为302.5 g·(kWh)$^{-1}$，1 t标准煤燃烧会排放2662 kg的CO_2、22 kg的SO_2、10 kg的NO_x和17 kg的总悬浮颗粒物（TSP）。研究发现，若特别适宜的区域全部开发，年碳减排量约2.947×10^9 t，是2021年内蒙古自治区碳排放总量的4.46倍，占我国2021年碳排放总量的21.20%。此外，可节约1.107×10^9 t标准煤，少排放SO_2约2.435×10^7 t、NO_x约1.107×10^7 t、TSP约1.882×10^7 t。若将特别适宜、较适宜、适宜区域全部开发，内蒙古自治区碳减排量约1.643×10^{10} t，是2021年我国碳排放总量的1.18倍，可节约6.174×10^9 t标准煤，少排放SO_2约1.358×10^8 t、NO_x约6.174×10^7 t、TSP约1.050×10^8 t。从以上分析可以看出，内蒙古自治区光伏开发对其碳减排、能源结构转型、乃至我国双碳目标实现至关重要。

3 结 论

本研究将GIS与AHP相结合，选取了气象、地形、位置、植被等多维度指标，运用AHP确定评价指标权重，对内蒙古自治区光伏开发的空间格局特征、发电潜力和节能减排效益进行研究，主要得出以下结论：

（1）内蒙古自治区开发适宜性具有显著的空间格局特征，西部的光伏开发适宜性大于中部和东部，特别适宜、较适宜和适宜区域占内蒙古自治区总面积的23.66%，主要分布在西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市，较不适宜和不适宜区域主要分布在东部的呼伦贝尔市和兴安盟。

（2）内蒙古自治区光伏发电潜力巨大。若将特别适宜、较适宜和适宜区域全部开发，年发电量将达到2.0409×10^{13} kWh，相当于内蒙古自治区2021年用电量的44.37倍，其中特别适宜的区域开发12.57%即可满足内蒙古自治区2021年用电量。

（3）内蒙古自治区光伏发电潜力与电力需求分布有着较强的空间异质性，空间格局特征显著。从整体来看，内蒙古自治区西部光伏发电潜力大于中部和东部。

（4）内蒙古自治区光伏发电节能减排效果显著。与传统燃煤火力发电相比，若特别适宜区全部开发，年碳减排量约2.947×10^9 t，是2021年内蒙古自治区碳排放总量的4.46倍，占我国2021年碳排放总量的21.20%，可节约1.107×10^9 t标准煤，少排放SO_2约2.435×10^7 t、NO_x约1.107×10^7 t、TSP约1.882×10^7 t。若将特别适宜、较适宜、适宜区域全部开发，内蒙古自治区碳减排量约1.643×10^{10} t，是2021年我国碳排放总量的1.18倍，节能减排效果显著。

参考文献（References）

[1] 王利珍, 谭洪卫, 庄智, 等. 基于GIS平台的我国太阳能光伏发电潜力研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(5): 491-496. [Wang Lizhen, Tan Hongwei, Zhuang Zhi, et al. Evaluation of the

photovoltaic solar energy potential in China based on GIS platform [J]. Journal of Shanghai University of Technology, 2014, 36(5): 491-496.]

[2] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益[J]. 自然资源学报. 2022, 37(5): 1338-1351. [Han Mengyao, Xiong Jiao, Liu Weidong. Spatio-temporal distribution, competitive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37 (5): 1338-1351.]

[3] Alami Merrouni A, Elwali Elalaoui F, Ghennioui A, et al. A GIS-AHP combination for the sites assessment of large-scale CSP plants with dry and wet cooling systems. Case study: Eastern Morocco[J]. Solar Energy, 2018, 166: 2-12.

[4] Vrinceanu A, Dumitrascu M, Kucsicsa G. Site suitability for photovoltaic farms and current investment in Romania[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 320-330.

[5] Ruiz H S, Sunarso A, Ibrahim-Bathis K, et al. GIS-AHP multi criteria decision analysis for the optimal location of solar energy plants at indonesia[J]. Energy Reports, 2020, 6: 3249-3263.

[6] Noorollahi Y, Ghenaatpisheh Senani A, Fadaei A, et al. A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach[J]. Renewable Energy, 2022, 186: 89-104.

[7] Hassaan M A, Hassan A, Al-Dashti H. GIS-based suitability analysis for siting solar power plants in Kuwait[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2021, 24(3): 453-461.

[8] Sun L, Jiang Y, Guo Q, et al. A GIS-based multi-criteria decision making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168: 105306, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105306.

[9] 刘立程, 孙中孝, 吴锋, 等. 京津冀地区光伏开发空间适宜性及减排效益评估[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 665-678. [Liu Licheng, Sun Zhongxiao, Wu Feng, et al. Evaluation of suitability and emission reduction benefits of photovoltaic development in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Geography, 2022, 77 (3): 665-678.]

[10] Yushchenko A, De Bono A, Chatenoux B, et al. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa[J]. Renewale & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2088-2103.

[11] 江东, 王娣, 付晶莹, 等. 内蒙古自治区未利用土地可再生能源潜力评估[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 60-69. [Jiang Dong, Wang Di, Fu Jingying, et al. Assessment of potential of renewable energy to be proclaced on unused land in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Science and Technology Herald, 2020, 38(11): 60-69.]

[12] Charabi Y, Gastli A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation[J]. Renewable Energy, 2011, 36 (9): 2554-2561.

[13] Villacreses G, Martínez-Gómez J, Jijón D, et al. Geolocation of photovoltaic farms using geographic information systems (GIS) with multiple-criteria decision-making (MCDM) methods: Case of the Ecuadorian energy regulation[J]. Energy Reports, 2022, 8: 3526-3548.

[14] 董秋霞, 董樊丽, 耿涌, 等. 碳达峰碳中和背景下内蒙古绿色低碳发展的路径和对策建议[J]. 科学管理研究, 2022, 40(6): 77-83. [Dong Qiuxia, Dong Fanli, Geng Yong, et al. The path and countermeasures of green and low-carbon development in Inner Mongolia under the background of carbon peak and neutrality[J]. Science Management Research, 2022, 40(6): 77-83.]

[15] Giamalaki M, Tsoutsos T. Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach[J]. Renewable Energy, 2019, 141: 64-75.

[16] 吕玉坤, 杨宇星, 赵伟萍. 低风速环境下光伏组件积灰特性模拟研究[J]. 电源技术, 2021, 45(6): 801-804, 827. [Lü Yukun, Yang Yuxing, Zhao Weiping. Ash deposition characteristics of photovoltaic modules under low wind speed numerical simulation[J]. Power Technology, 2021, 45(6): 801-804, 827.]

[17] Raza M A, Yousif M, Hassan M, et al. Site suitability for solar and wind energy in developing countries using combination of GIS-AHP: A case study of Pakistan[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 180-191.

[18] Huang T, Wang S, Yang Q, et al. A GIS-based assessment of large-scale PV potential in China[J]. Cleaner Energy for Cleaner Cities, 2018, 152: 1079-1084.

[19] 叶小伟, 乔建芳. 乌兹别克斯坦可再生能源现状及中乌合作建议[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1313-1319. [Ye Xiaowei, Qiao Jianfang. Current situation of renewable energy in Uzbekistan and suggestions on China-Uzbekistan cooperation[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1313-1319.]

[20] Zhao L, Jia K, Liu X, et al. Assessment of land degradation in Inner Mongolia between 2000 and 2020 based on remote sensing data[J]. Geography and Sustainability, 2023, 4(2): 100-111.

[21] Li X, Mauzerall D L, Bergin M H. Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 720-727.

[22] 达成, 张富涛, 钱勇生, 等. 关中平原城市群"交通-产业-环境"耦合协调发展的动态演化特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45 (3): 955-965. [Da Cheng, Zhang Futao, Qian Yongsheng, et al. Dynamic evolution characteristics of coordinated development of transportation-industry-environment in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 955-965.]

Spatial suitability and emission reduction benefits of photovoltaic development in Inner Mongolia

XU Wei, LIU Zhenling

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: As an important photovoltaic (PV) power generation base, the Inner Mongolia Autonomous Region (IMAR), China has seen the problem of blindly constructing PV power stations become more prominent in recent years. It is of great significance to grasp the suitability of regional PV development, power generation potential, and emission reduction benefits for the healthy development of the PV industry. To explore the suitability of PV development in the IMAR and the benefits of emission reduction, this study makes comprehensive use of meteorological, natural geographic, economic, and social data, constructs a comprehensive evaluation index system of PV development suitability in the form of meteorology-terrain-location-vegetation, uses an analytic hierarchy process to determine the weights of the evaluation indexes, and performs a spatially explicit evaluation of the suitability of PV development in the IMAR with the aid of a geographic information system tool to quantitatively assess the potential of PV power generation and emission reduction benefits under different development intensities. The PV power generation potential of the leagues and cities and the demand for electric power are compared. The results are as follows: (1) The suitability of PV development in the western part of the IMAR is greater than that in the central and eastern parts, and the various suitable areas are mainly located in the western Alagxa League and Bayannur City, with particularly suitable areas for PV development accounting for 23.66% of the total area of the IMAR. (2) The IMAR PV power generation potential is enormous, especially for regional development, where 12.57% of it can meet the IMAR 2021 electricity consumption. (3) The distribution of PV power generation potential and electricity demand in the IMAR has strong spatial heterogeneity, and the spatial pattern is characterized by significant features. (4) The energy saving and emission reduction effect of PV power generation in the IMAR is remarkable. Compared with conventional coal-fired thermal power generation, the annual carbon emission reduction is approximately 2.947×10^9 t if the development of a special suitable area is performed, which is 4.46 times the total carbon emission of the IMAR in 2021 and accounts for 21.20% of China's total carbon emission in 2021. These results provide scientific references and guiding suggestions for the placement of PV power stations and the healthy development of the PV industry in the IMAR.

Key words: geographic information system; photovoltaic power generation; suitability evaluation; generation potential; emission reduction benefits; Inner Mongolia